

实验14 波形发生电路分析与设计



《电子技术基础实验教程》

实验15 正弦波振荡电路设计 (P.327-330)

实验17 方波三角波发生电路设计 (P.338-341)

一、实验目的

A. RC桥式正弦振荡电路设计

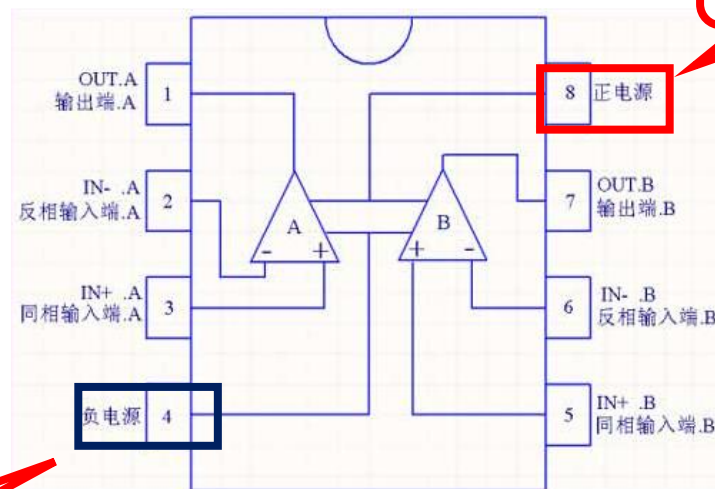
1. 正弦波振荡电路的起振条件。
2. 正弦波振荡电路稳幅环节的作用以及稳幅环节参数变化对输出波形的影响。
3. 选频电路参数变化对输出波形频率的影响。
4. 学习正弦振荡电路的仿真分析与调试方法。

B. 用集成运放构成的方波、三角波发生电路设计

1. 掌握方波和三角波发生电路的设计方法。
2. 主要性能指标的测试。
3. 学习方波和三角波的仿真与调试方法。

二、实验器材

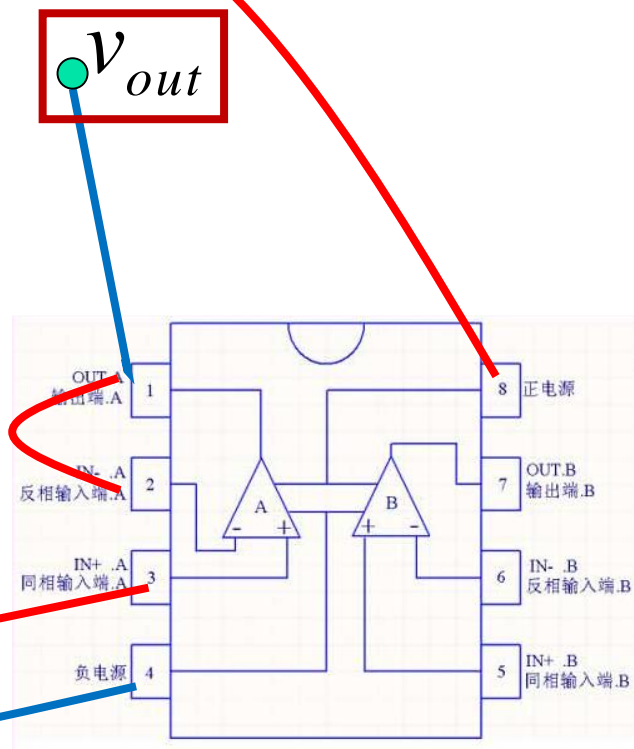
- 示波器、万用表
- 模电实验箱



负电源

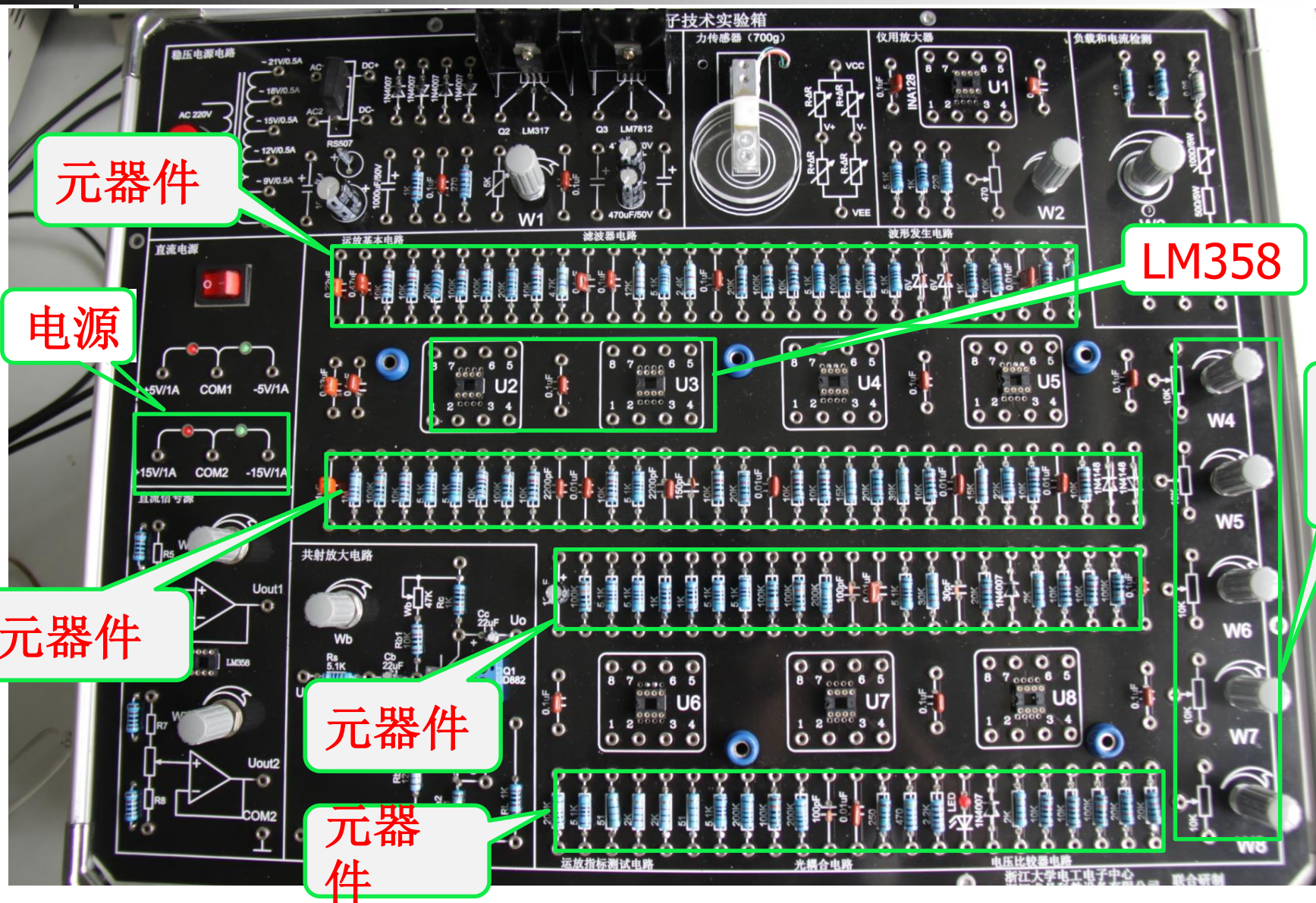
LM358芯片管脚排列

芯片的检查方法



调节电位器，当 $v_{out} = u_{out1}$ 时，说明芯片是好的。

实验箱介绍



三、实验准备：

阅读实验说明部分内容。

《电子技术基础实验教程》

实验15 正弦波振荡电路设计 (P. 327-330)

实验17 方波三角波发生电路设计 (P. 338-341)

使用**Multisim**软件对电路进行仿真。

四、电路设计原理

A. RC桥式正弦振荡电路设计

RC桥式正弦波振荡电路通常由放大环节、选频网络、稳幅环节等组成。

R_1 、 R_f 和集成运放组成负反馈电路，起放大和稳幅作用；RC串并联网络和集成运放构成正反馈电路，起正反馈和选频作用。

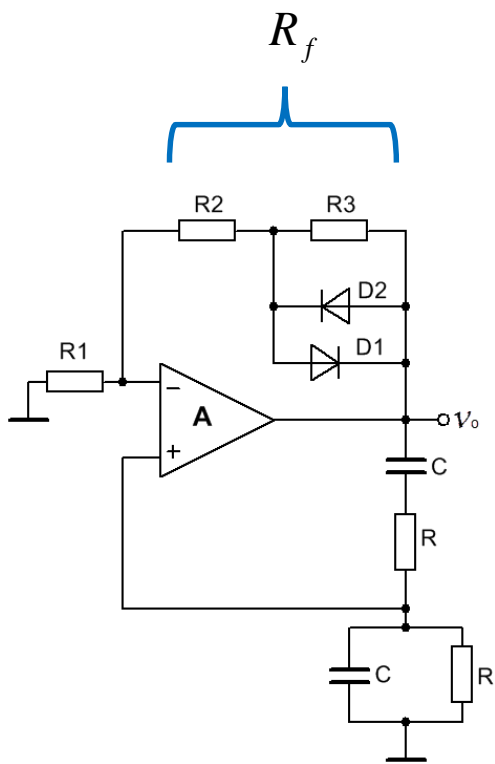
电路正常工作（振荡），要求：

$$A_f = 1 + \frac{R_f}{R_1} \geq 3 \quad \text{即} \quad R_f \geq 2R_1$$

$$\text{振荡频率:} \quad f_o = \frac{1}{2\pi RC}$$

R_f 由固定电阻 R_2 和 R_3 以及二极管 D_1 、 D_2 组成

D_1 和 D_2 起自动稳幅作用，它们接入与否将影响输出波形的失真情况和振荡的稳定性。



正弦波振荡电路

四、电路设计原理

设计一个振荡频率 $f_0=1.54\text{KHz}$ 的RC桥式正弦波振荡电路。

(1) 确定 RC串并联选频网络的参数

RC串并联选频网络的参数应根据所要求的振荡频率 f_0 来确定。为了使RC串并联电路的选频特性尽量不受集成运算放大器输入电阻和输出电阻的影响，应按下列关系来初选电阻R的值：

$$R_{id} \gg R \gg R_o$$

式中， R_{id} 为集成运算放大器的差模输入电阻，一般在几百千欧以上；

R_o 为集成运算放大器的输出电阻，一般在几百欧以下。

$$\text{初选 } R = 10\text{k}\Omega, \quad C = \frac{1}{2\pi f_0 R} = \frac{1}{2 \times 3.14 \times 1.54 \times 10^3 \times 10 \times 10^3} F = 0.01034\mu F$$

取标称值 $C = 0.01\mu F$ ，则重新计算可得： $R = 10.339\text{k}\Omega$ ，取标称值 $R = 10\text{k}\Omega$
注意选择稳定性较好的电阻和电容，否则将影响振荡频率的稳定性。

四、电路设计原理

(2) 确定 R_1 和 R_f

因为 $R_f \geq 2R_1$ ，通常取 $R_f = 2.1R_1$ ，这样既能保证起振，又不至于引起严重的波形失真。此外，为了减小运算放大器输入失调电流及其温漂的

影响，还应尽量 $R = R_1 // R_f$ ，即 $R = \frac{R_1 R_f}{R_1 + R_f} = \frac{2.1}{3.1} R_1$

所以 $R_1 = \frac{3.1}{2.1} R = \frac{3.1}{2.1} \times 10k\Omega \approx 15k\Omega$

四、电路设计原理

(3) 稳幅元件及参数的确定

根据振荡幅度的变化，采用非线性元件来自动改变放大电路中负反馈的强弱，以实现稳幅目的。本实验中稳幅电路由两只反向并联的二极管和电阻 R_3 组成，利用二极管正向电阻的非线性特性实现稳幅作用。

稳幅二极管的选择：

- a. 温度 选用硅二极管
- b. 振幅上、下半波对称 配对选用二极管，使两只二极管的特性相同

R_3 的选择：与二极管的正向电阻 R_d 接近时，稳幅作用和波形失真都有较好的效果。 R_3 通常选几千欧，并通过实验来调整。

R_2 的阻值选定：
$$R_2 = R_f - (R_3 // R_d) \approx R_f - \frac{1}{2} R_3$$

若取 $R_3 = 10k\Omega$ ，由 $R_f = 31.5k\Omega$ 可求得 $R_2 = 21.5k\Omega$ 。

四、电路设计原理

(4) 集成运算放大器的选择

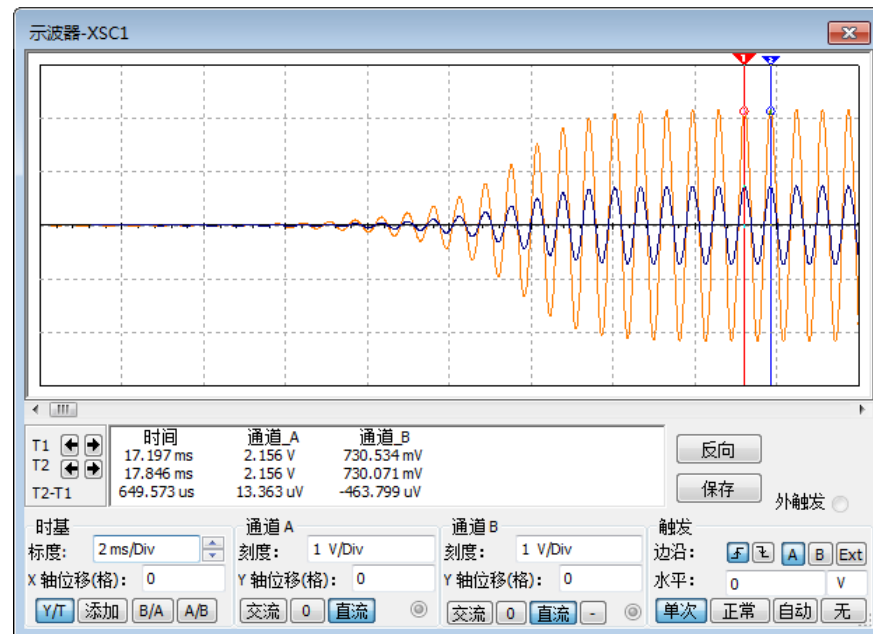
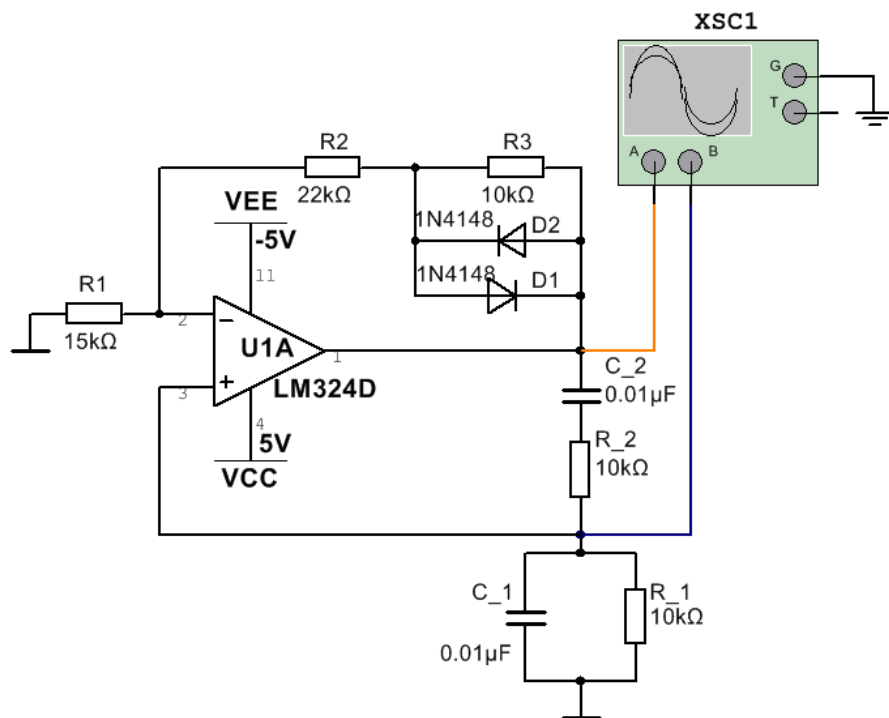
在选择集成运算放大器时，除了要求输入电阻较高和输出电阻较低外，最主要的是要求集成运算放大器的增益带宽积应满足下列关系：

$$A \bullet f_{BW} > 3f_o$$

五、正弦波发生电路的调试

- 1、调整反馈电阻 R_f ，使电路起振，且波形失真最小。如不能起振，说明负反馈太强，应适当增大 R_f 。如波形失真严重，则应适当减小 R_f 。
- 2、 R_3 的取值需兼顾稳幅作用和波形失真，可通过实验来调整。
- 3、改变选频网络的 R 或 C ，即可调节振荡频率。一般采用改变 C 作频率量程的切换，改变 R 作频率量程内的细调。
- 4、若要改变正弦波输出幅度，可将 R_1 或 R_2 用电位器替换，调节电位器阻值可改变输出正弦波的幅度，频率保持不变。

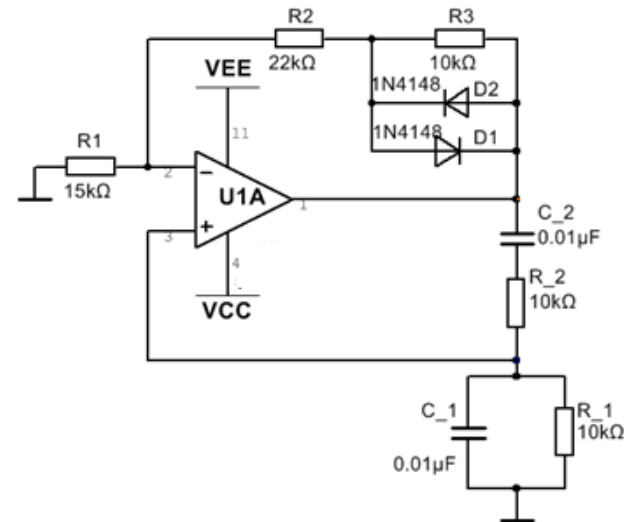
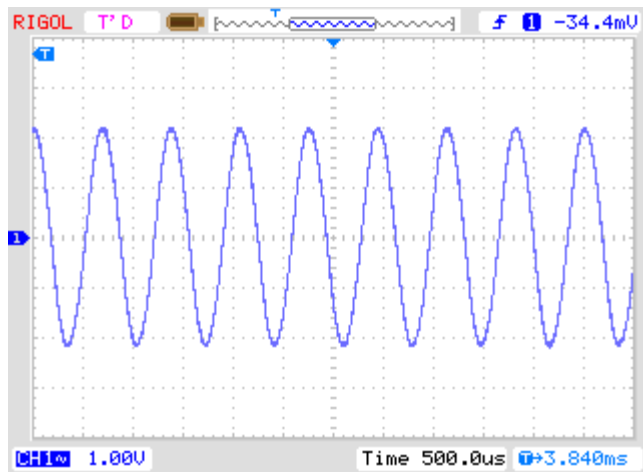
六、正弦波发生电路的Multisim仿真



$$f_0 = 1/649.573 \mu s = 1.54 \text{ kHz}$$

六、正弦波发生电路设计

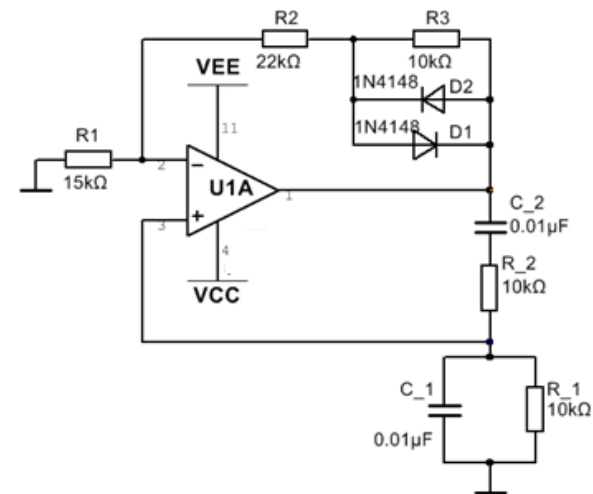
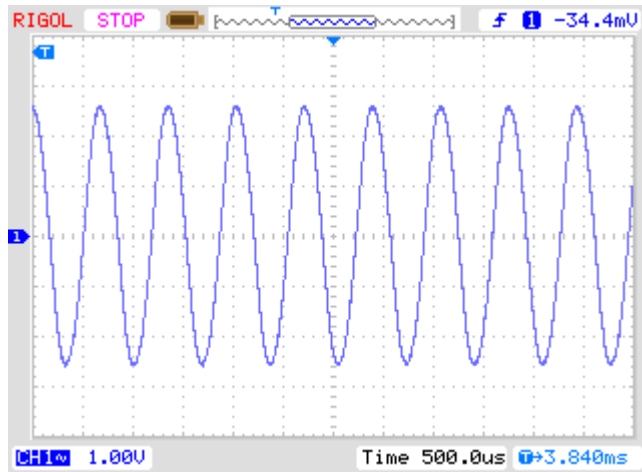
正弦波发生电路的实现方案（一） $\mu A741$



- 1、振荡频率 $f_0=1.479\text{kHz}$;
- 2、输出正弦波幅值 $V_{om}=2.88\text{V}$;
- 3、谐波失真度 $\gamma=2.11\%$ 。

六、正弦波发生电路设计

正弦波发生电路的实现方案（二）LM358（必做）

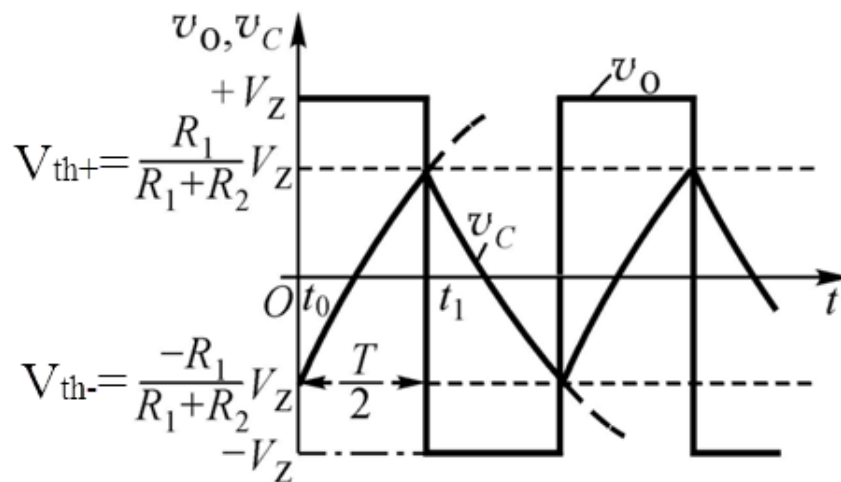
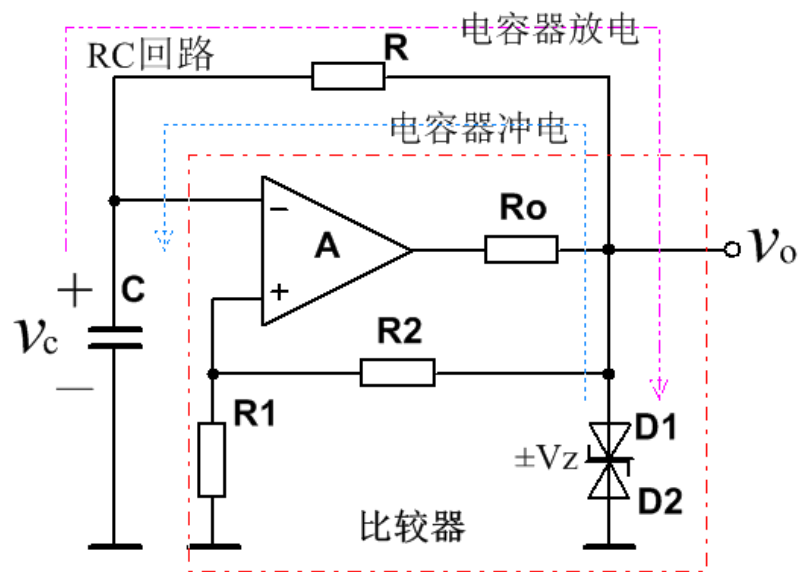


- 1、振荡频率 $f_0 = 1.462\text{kHz}$;
- 2、输出正弦波幅值 $V_{om} = 2.80\text{V}$;
- 3、谐波失真度 $\gamma = 2.42\%$ 。

七、电路设计原理

B. 用集成运放构成的方波发生电路设计（之一）

方波发生电路由反相输入的滞回比较器和普通RC积分电路组成。RC回路既作为延迟环节，又作为反馈网络，通过RC充、放电实现输出状态的自动转换。波形图中的 V_{th-} 和 V_{th+} 分别为滞回比较器负门限电压和正门限电压。该电路线路简单，但三角波的线性度较差，主要用于产生方波。



$$T = 2RC \ln \left(1 + \frac{2R_1}{R_2} \right)$$

七、电路设计原理

- R_1 、 R_2 组成正反馈网络，当有输出电压 v_o 时，运放同相端的反馈电压为 $V_{f(+)} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} v_o$ 。 R 、 C 组成的充放电回路形成负反馈网络。
- 运放仅起到比较器的作用：利用电容两端电压 $V_{f(-)}$ 和 $V_{f(+)}$ 比较，决定 v_o 的正负， v_o 的正负又决定了通过电容的电流是充电（使 v_C 增加）还是放电（使 v_C 减小），如此不断反复，就在输出端产生了周期性的方波。
- 电路中两个稳压二极管 D_1 和 D_2 ，保证了方波的正负对称性。 R_0 为稳压二极管的限流电阻。
- 电路振荡周期： v_C 电压幅度：
输出方波电压幅度：

七、电路设计原理

设计一个由滞回比较器和RC电路组成的 $f_0=1\text{kHz}$ 的方波发生电路。

选择 $R_1 = 2R_2 = 15\text{k}\Omega$, $C = 0.022\text{ }\mu\text{F}$ 。

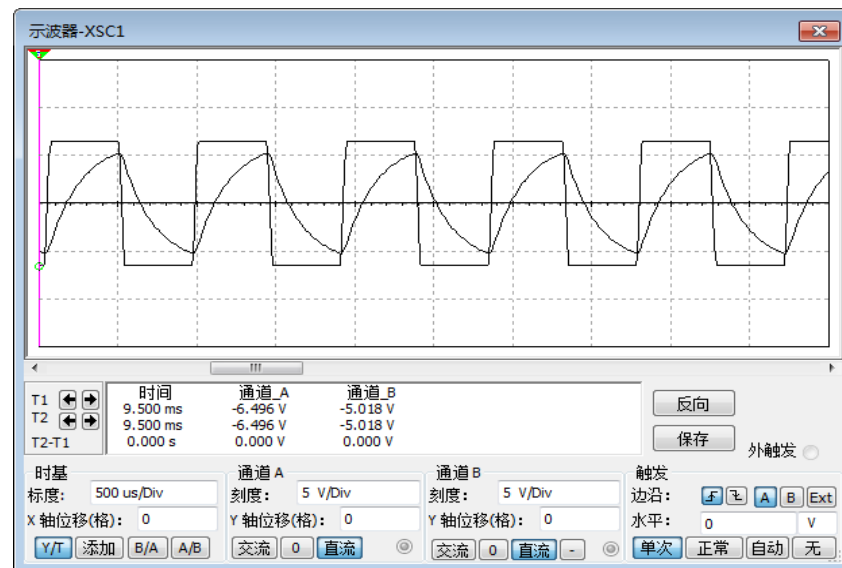
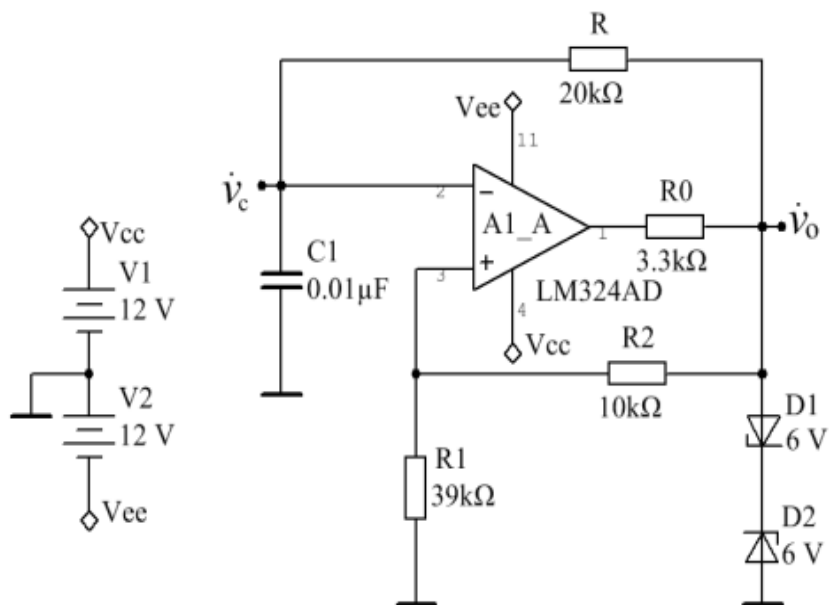
根据 $f = \frac{1}{2RC \ln(1 + \frac{2R_1}{R_2})}$, 得 $R = 32.78\text{ k}\Omega$ 。

为了校准频率, 通常 R 采用固定电阻与变阻器串联构成, 取电阻器为 $30\text{k}\Omega$, 变阻器为 $15\text{k}\Omega$, 尽量满足 $R = R_1 // R_{f_0}$ 。

八、方波发生电路的调试

- 1、在考虑正反馈支路 R_1 和 R_2 的取值时，必须注意不能使输出电压 v_o 反馈到同相端的电压 $V_{f(+)}$ 峰峰值超过运算放大器的共模输入电压 V_{ICR} 范围，否则会损坏运放。
- 2、输出电压的高电平时间 T_1 与输出电压周期 T 之比称为占空比。通过改变电容器 C 的充放电时间常数，就可以获得占空比可调的矩形波电路。
- 3、调节 R 参数，可改变方波的输出频率。
- 4、调节比较电压值（ R_2 / R_1 ）也可改变方波频率，但同时三角波的幅值也随之变化。如要互不影响，仍需通过调节 R 或 C 参数来改变频率。

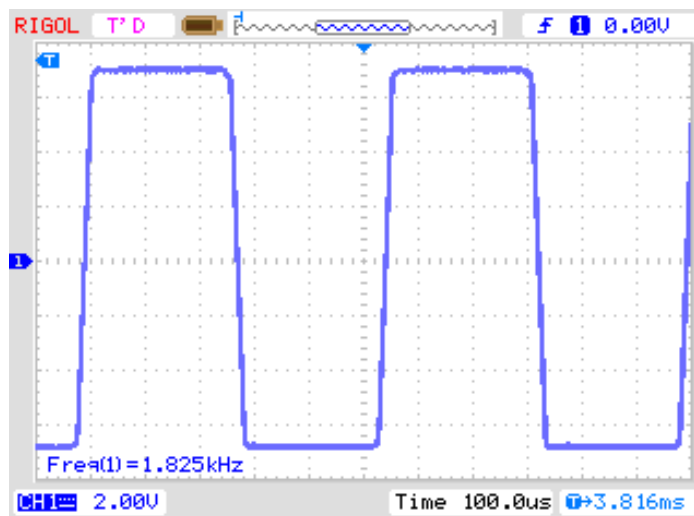
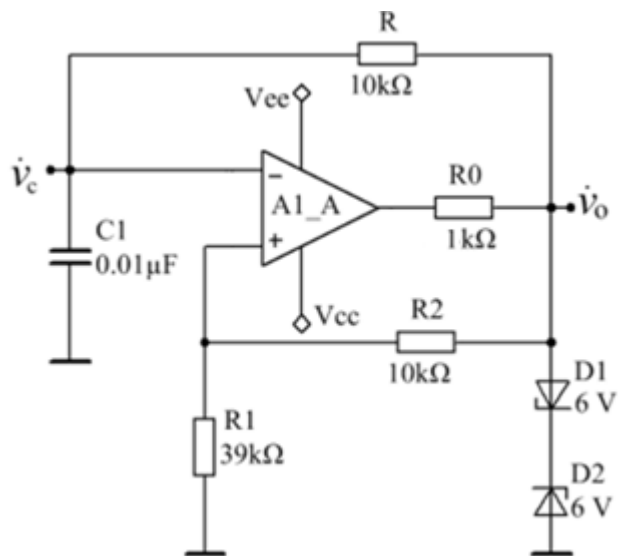
九、方波发生电路的Multisim仿真



$$f_o = 1.068 \text{ kHz}$$

十、方波发生电路的设计

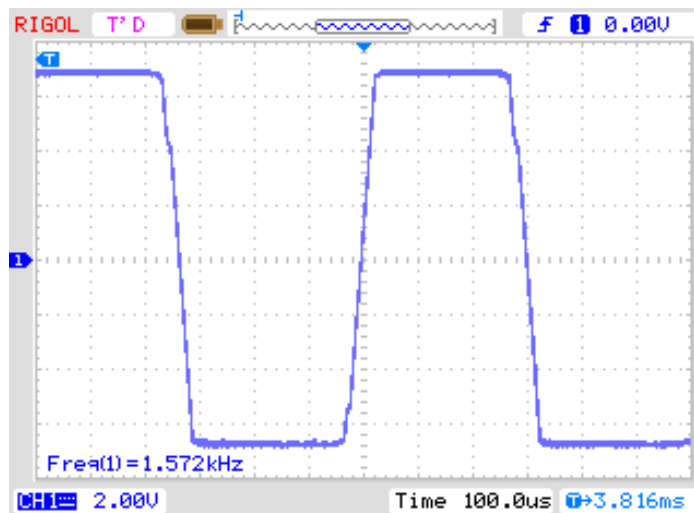
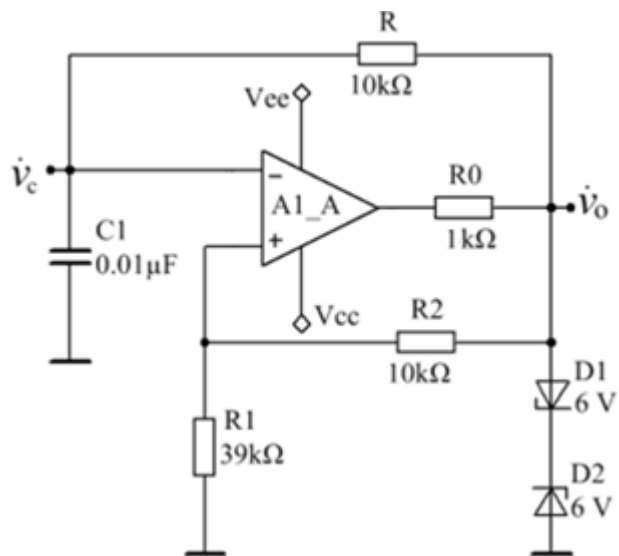
方波发生电路的实现方案（一） $\mu A741$



- 1、方波频率 $f_0=1.825kHz$;
- 2、输出方波幅值 $V_{om}=\pm 6.4V$;
- 3、上升时间 $t_r=25.8\mu s$ 。

十、方波发生电路的设计

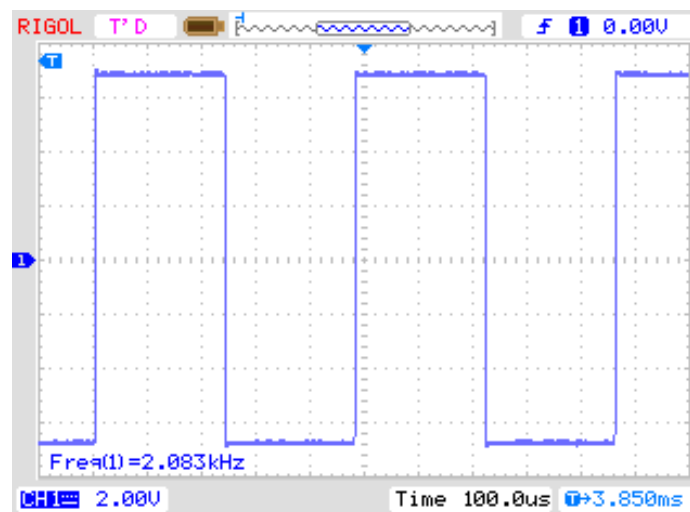
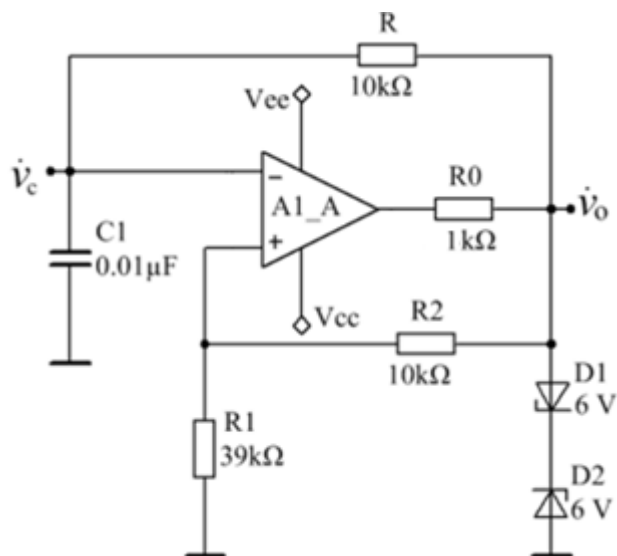
方波发生电路的实现方案（二）LM358（选做）



- 1、方波频率 $f_0 = 1.572\text{kHz}$;
- 2、输出方波幅值 $V_{om} = \pm 6.4\text{V}$;
- 3、上升时间 $t_r = 56.0\text{μs}$ 。

十、方波发生电路的设计

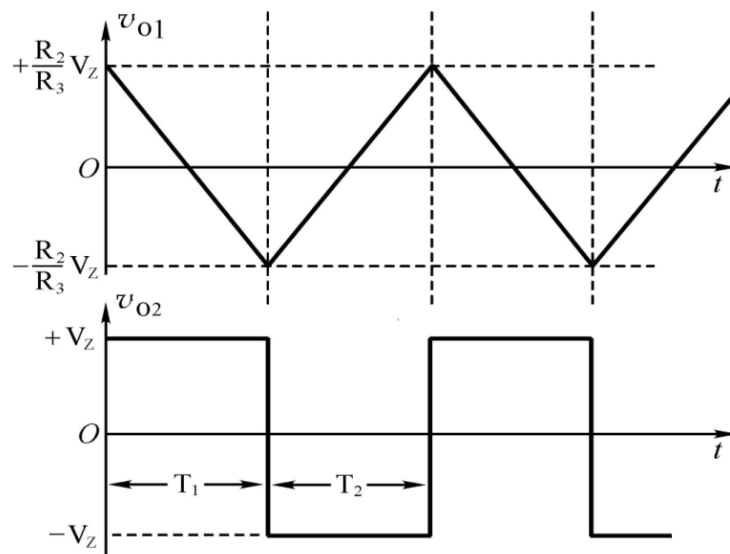
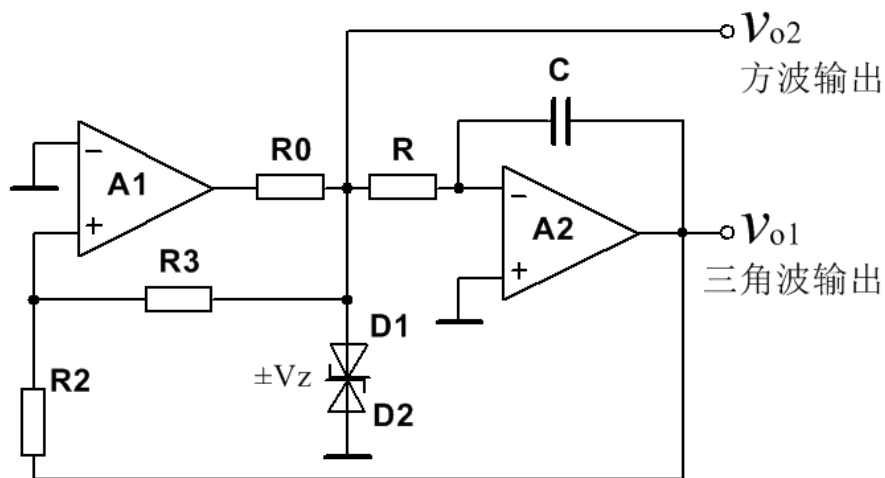
方波发生电路的实现方案（三） LF353



- 1、方波频率 $f_o=2.083\text{kHz}$;
- 2、输出方波幅值 $V_{om}=\pm 6.4\text{V}$;
- 3、上升时间 $t_r=1.36\text{ }\mu\text{s}$ 。

B. 用集成运放构成的方波、三角波发生电路设计（之二）

更常用的方波三角波发生电路是由集成运放组成的滞回比较器与积分器组成，由于采用了由集成运放组成的积分器，电容C始终处在恒流充、放电状态，使三角波的线性度大为改善，而且也便于调节振荡频率和幅度。



集成运放A1构成同相滞回比较器，A1同相端电位 v_{P1} 由 v_{o1} 和 v_{o2} 确定。利用叠加定理可得：

$$v_{P1} = \frac{R_3}{R_3 + R_2} v_{o1} + \frac{R_2}{R_3 + R_2} v_{o2}$$

当 $v_{P1} > 0$ 时，即 $v_{o2} = +V_Z$ ；当 $v_{P1} < 0$ 时，即 $v_{o2} = -V_Z$ 。

集成运放A2构成反相积分器， v_{o2} 为正时， v_{o1} 向负向变化； v_{o2} 为负时， v_{o1} 向正向变化。设电源接通时 $v_{o2} = +V_Z$ ， v_{o1} 线性减小。当 v_{o1} 下降到 $-(R_2/R_3)V_Z$ 时，A1的输出翻转到 $v_{o2} = -V_Z$ 。

三角波的输出幅度：

$$V_{om1} = V_{TH} = IR = \frac{V_Z}{R_3} R_2 = \frac{R_2}{R_3} V_Z ; \quad -V_{om1} = V_{TL} = -\frac{R_2}{R_3} V_Z$$

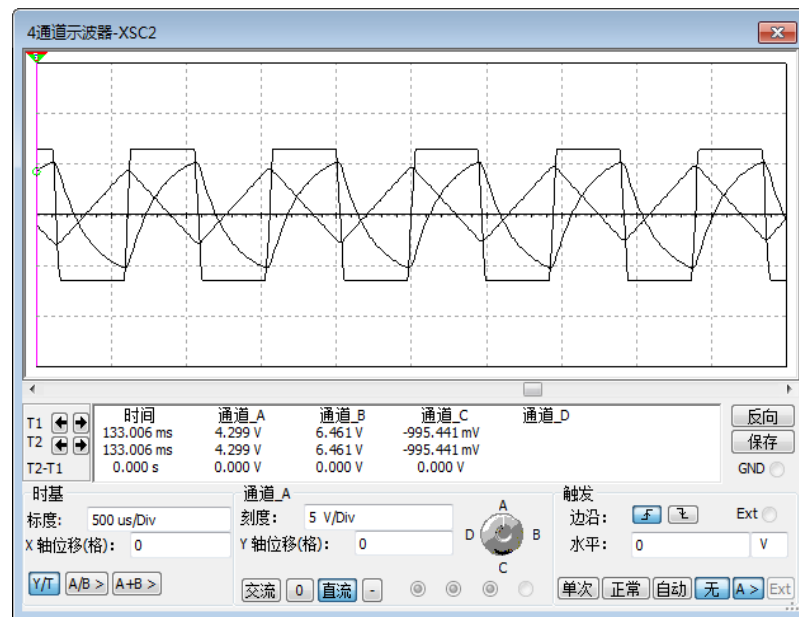
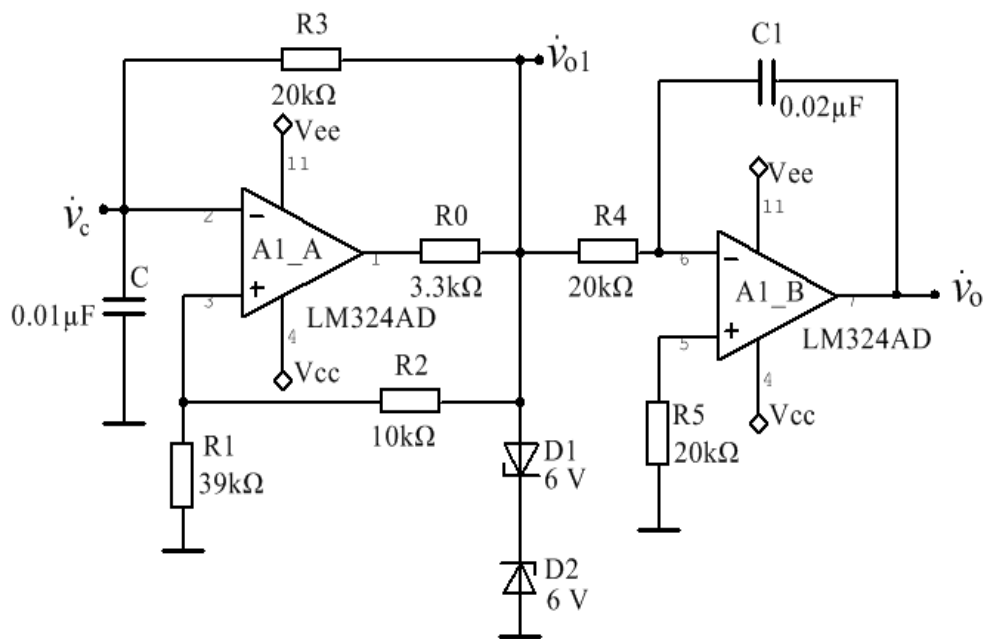
振荡周期：

$$T = 4RC \frac{V_{om1}}{V_Z} = 4RC \frac{R_2}{R_3}$$

振荡频率：

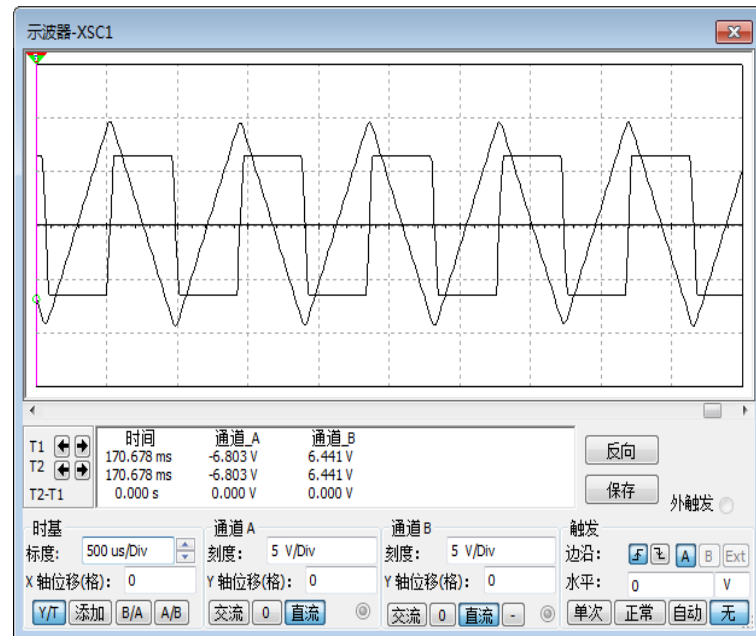
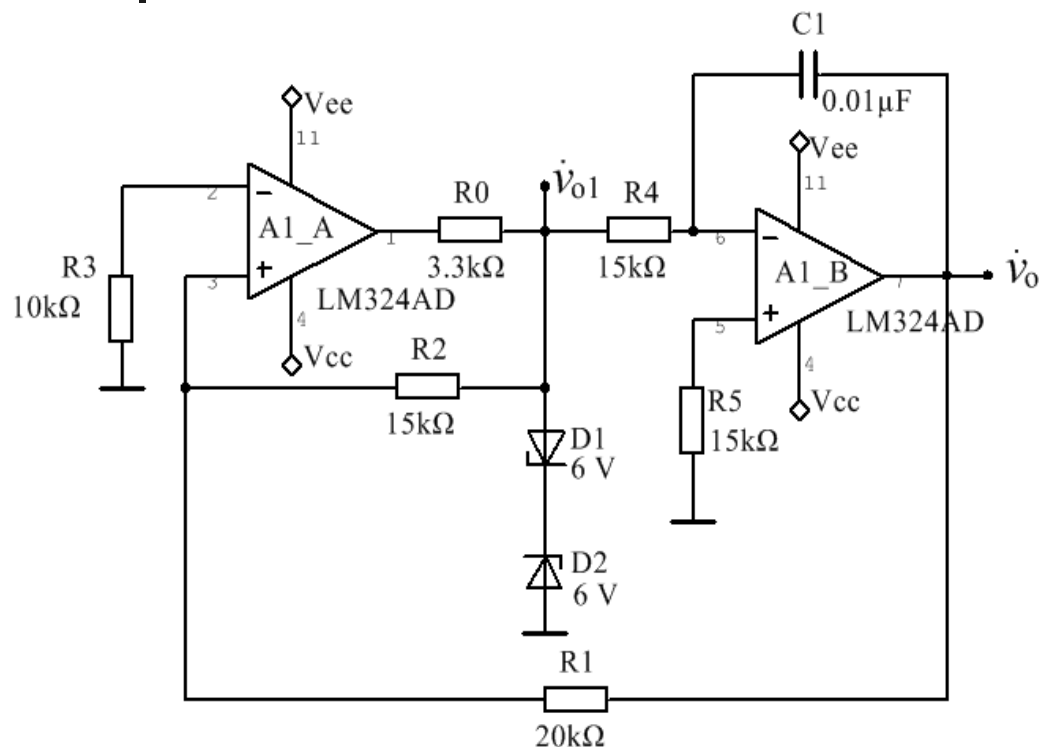
$$f = \frac{1}{T} = \frac{R_3}{4RR_2C}$$

十二 三角波发生电路的Multisim仿真



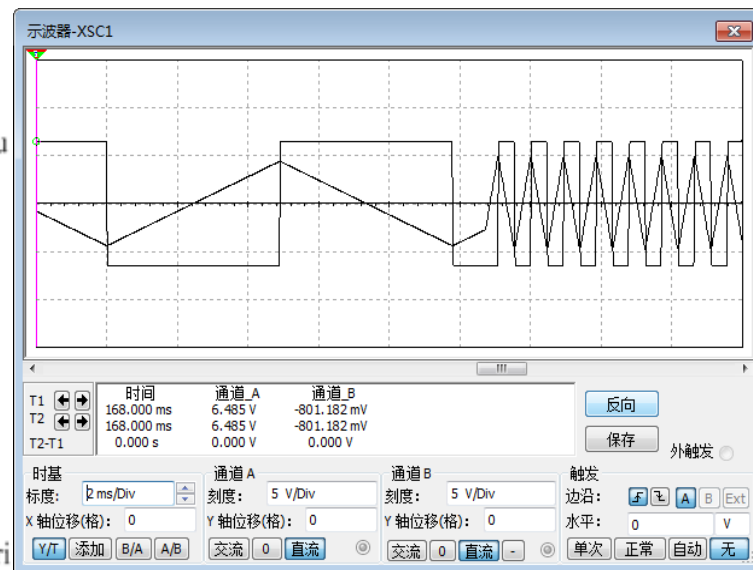
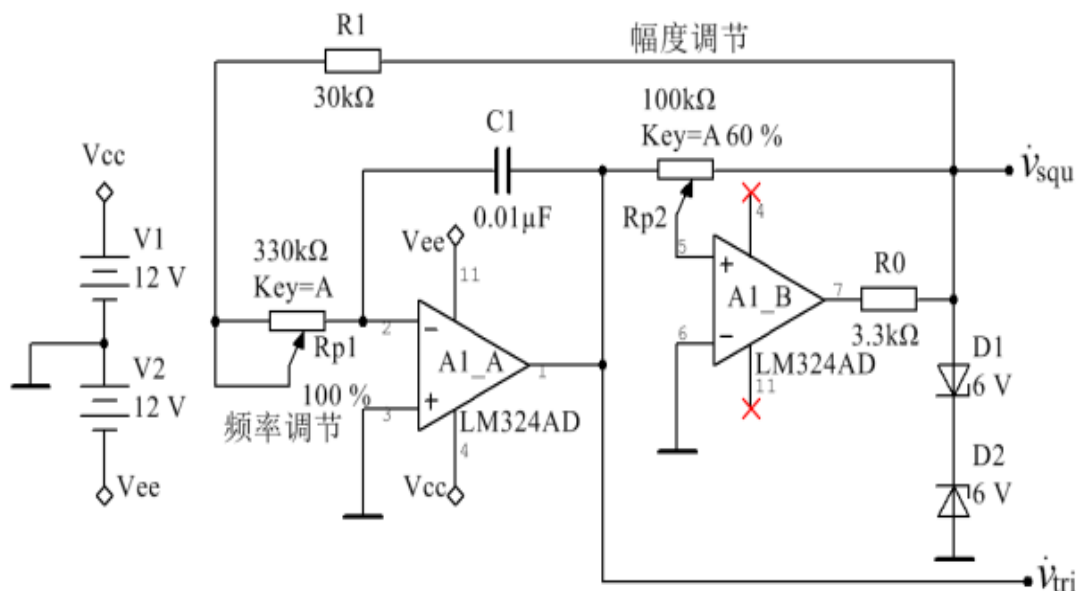
方波发生电路与积分运算电路构成的三角波发生电路

十二 三角波发生电路的Multisim仿真



恒流源充电的三角波发生电路

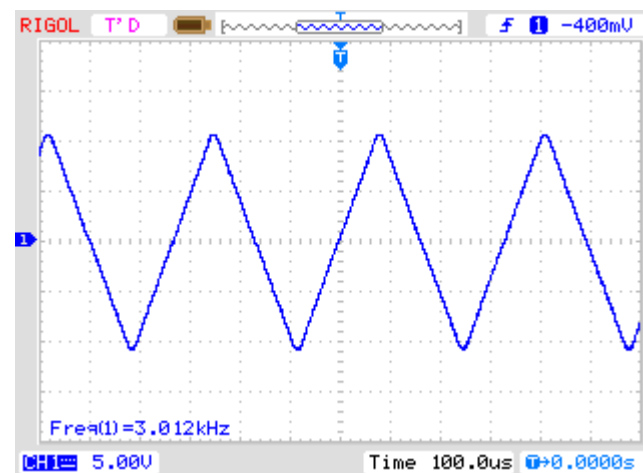
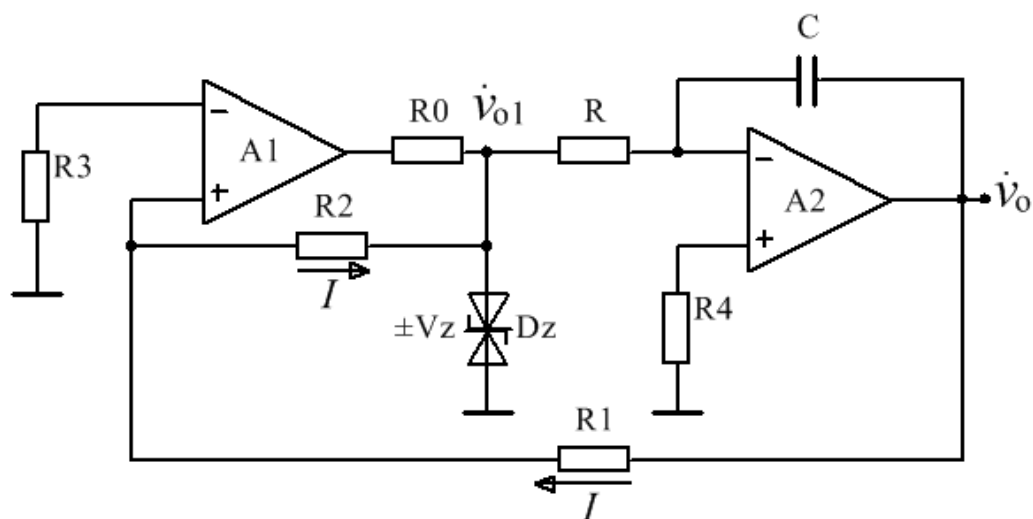
十二 三角波发生电路的Multisim仿真



幅度与频率可调的三角波发生电路

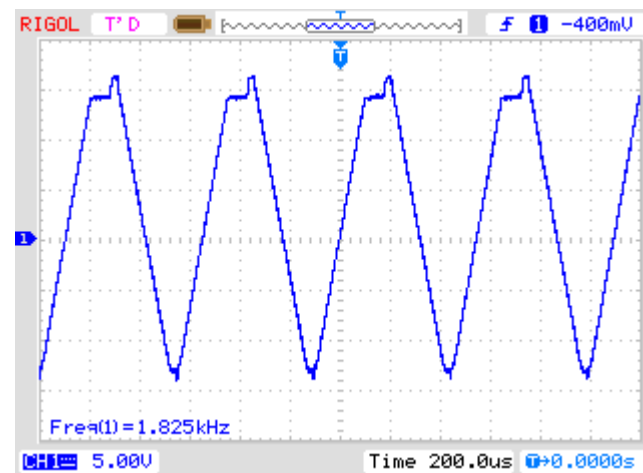
十三 三角波发生电路设计

三角波发生电路的实现方案（一） $\mu A741$



- 1、三角波频率 $f_0 = 3.012\text{kHz}$;
- 2、输出三角波幅值 $V_{om} = \pm 12\text{V}$ 。

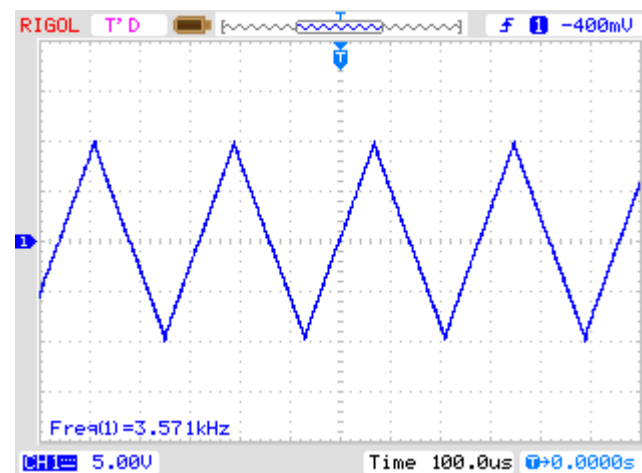
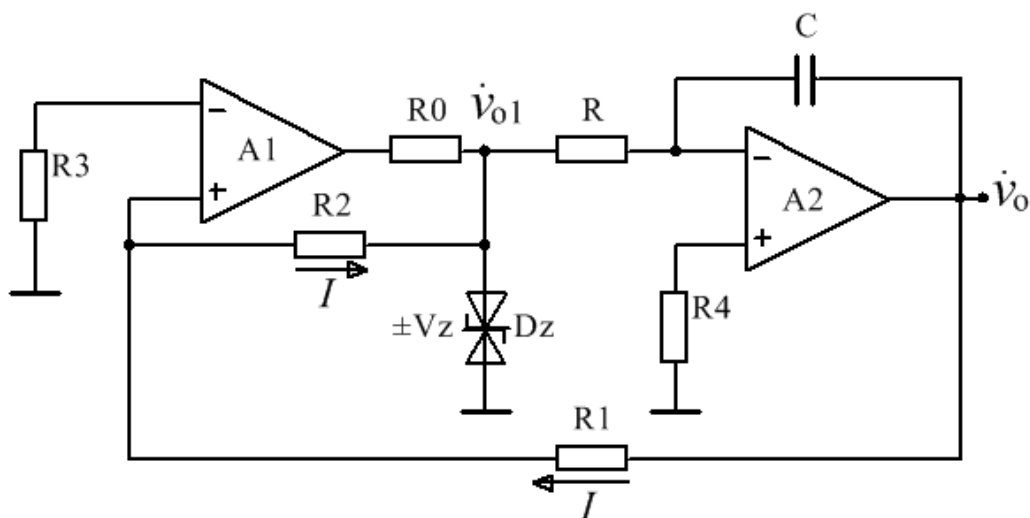
三角波发生电路的实现方案（二）LM358（必做）



- 1、方波频率 $f_0=1.825\text{kHz}$;
- 2、输出方波幅值 $V_{\text{om}}=\pm 15\text{V}$;

十三 三角波发生电路设计

方波发生电路的实现方案（三） LF353



- 1、方波频率 $f_0 = 3.571\text{kHz}$;
- 2、输出方波幅值 $V_{om} = \pm 9\text{V}$;

十四 实验总结

A、正弦振荡电路

- 1、画出所设计的桥式正弦波振荡电路，记录Multisim仿真分析波形。
- 2、整理实验数据，记录示波器显示波形，并和理论设计值相比较。
- 3、分析调节 R_2 时，输出电压 v_0 从无到有，从正弦波直至削顶，出现这三种情况的原因和条件。

讨论：

- 1、二极管D1和 D2开路，则输出波形有何变化？
- 2、R3开路，则输出波形有何变化？

B、方波、三角波电路

- 1、写出设计过程和仿真结果，画出布线图。
- 2、整理实验数据，并与理论设计相比较。
- 3、在坐标纸上画出所记录的方波和三角波波形，并标明幅度和周期。
- 4、分析实验中所遇到的现象。

- 下周随堂测试
- 类型：填空题、选择题、简答题、设计题、做题中的其中几种。
- 带尺子、橡皮、铅笔。
- 完成所有实验报告的提交工作，确认平时成绩已全部已知。